

結氷する港湾に対応する 水中構造物点検技術に関する技術開発について —コンクリート構造物水中部劣化診断システムの開発—

(独) 土木研究所寒地土木研究所寒地機械技術チーム ○五十嵐 匡
(独) 土木研究所寒地土木研究所道央支所 長瀬 禎
国際航業(株) 北海道支店 大西 明夫

港湾及び漁港施設における水中構造物の健全度診断は有効な点検手法が確立されておらず、潜水士による目視観察に頼っているのが現状である。

本技術開発においては、潜水士を必要としないで水中部の構造物（コンクリート構造形式）の状況を計測する技術の開発と、計測データを蓄積して効率的に健全度診断を行えるシステムを開発するものである。

本開発は国際航業（株）との共同研究であり、本年度実施した音響カメラを使った現地計測試験状況を報告するものである。

キーワード：港湾構造物、点検、劣化、音響カメラ

1. 概要

港湾施設は、厳しい自然条件にさらされており、その多くは、建設後、相当の年数が経過して、劣化が進行しているものも少なくない。しかし、海中部分の構造物は外観から劣化を確認しにくく、また、補修を行うにも多くの困難を伴うのが実態である。

水中部の点検については、陸上で点検の指示を行う技師と水中で実際に目視点検を行う潜水士との連携が重要であり、透明度による影響も大きく、視界の悪い箇所については潜水士が手探り状態で異常箇所を確認している等、非効率で困難な作業となっている。

本開発は、水中部のコンクリート構造物の劣化を視界の悪い箇所でも潜水士を必要とせずに簡易に診断する総合的なシステムを開発することを目的としている。

1 測線上に撮影する。(図-1) この作業を水深に応じて繰り返し、画像解析ソフトウェアで構造物水中部分全体のモザイク図を作成する。

本年度のスキームを図-2に示す。

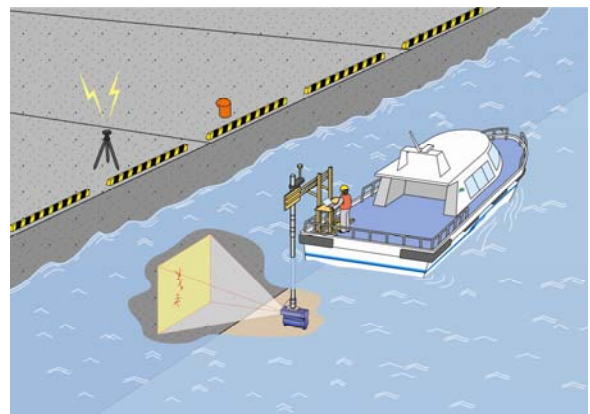


図-1 イメージ図

2. 開発計画（平成20年度）

本年度は、本開発の最終目標である点検計測システムにおいて必要となる構造物水中部分全体のモザイク図の作成を行っている。

船舶に艀装されたポール状の架装装置先端に撮影装置（音響カメラ）を固定し、岸壁面水中部を撮影する。船舶は岸壁面と一定距離を保ちながらゆっくりと航行し、

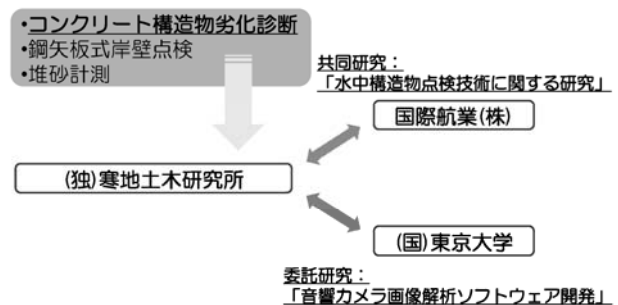


図-2 スキーム図

3. 過年度（平成18、19年度）試験経過

平成18、19年度は、現状の点検調査方法を把握するため、実態調査及び点検技術の動向調査を実施した。

撮影装置は、可視画像法と音響画像法の得失について比較検討した結果、音響レンズを使用した「音響カメラ」の採用が最も有利と判断した。

また、音響カメラを使用し、水槽及び実海域において、基本性能の確認、岸壁面全体の撮影方法の検討を行った。

(1) 音響カメラ

選定した2周波音響カメラ・DIDSON（Dual-Frequency Identification Sonar）は、周波数1.8MHz（又は1.0MHz）の音波を使用し、水平（左右）方向 29° ＝幅 0.3° 間隔 \times 96ビーム（又は 0.6° 間隔 \times 48ビーム）、垂直（縦）方向 12° 幅のビームパターンを形成する。（図-3）そして、8回（又は4回）の送受信サイクルに分割したビーム画像ラインを張り合わせて1画面を形成し、毎秒5～27フレームの画像を提供する。

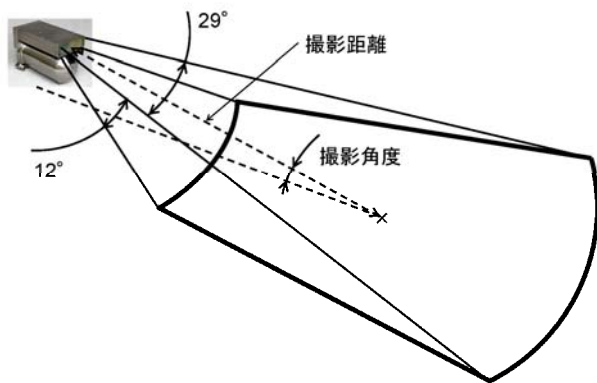


図-3 音響カメラのビームパターン

画像は、水平方向に96分割、垂直方向に512分割で照射された音波の反射強度により画像化され、反射エコーが強ければ明るい光、弱ければ薄暗い光にかえて画面上で輝かせることで、白黒の映像が作り出される。

従って、周囲の明暗や海水の濁度に関係なく撮影することができる。

写真-1は岸壁面を撮影したものを専用ソフトウェアにてPC画面上に表示したものである。

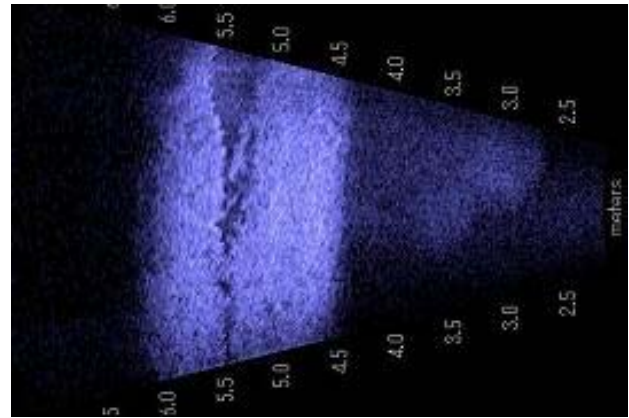


写真-1 専用ソフトウェアによる撮影画像

(2) 水槽及び実海域試験

音響カメラの基本性能、現場での適応性・性能限界を把握するため、水槽及び実海域試験を行った。

試験では、コンクリート平板表面にクラック等を疑似再現した供試体を製作し、岸壁面までの距離、撮影角度の条件別に撮影を行い、分解能や撮影に適した角度を確認した。

水槽試験では、音響カメラを水槽底面と水平にして、被写体に対し垂直方向に角度をとり移動させると（図-4 a）、 $10\sim 30$ 度において良好な画像が得られた。また、水平方向に角度をとり移動させると（図-4 b）、 $60\sim 120$ 度の範囲においてが良好な画像が得られた。

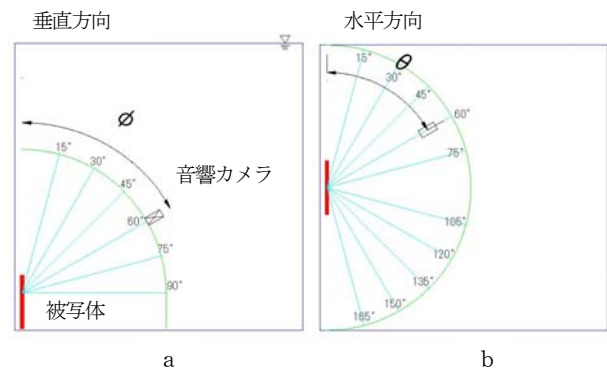


図-4 撮影パターン（水槽試験）

実海域試験では、音響カメラを取り付けた船舶で移動しながら撮影を行った。

進行方向に対し音響カメラを前向き、下向きのそれぞれに取付けて撮影したが、下向きの場合、取得画像から変状を推定することは困難であった。

理由として、前向きでは512分割した画像が得られることに対し（図-5 a）、下向きではその方向の表示範囲を96分割した画像しか得られないことに起因している。（図-5 b）。

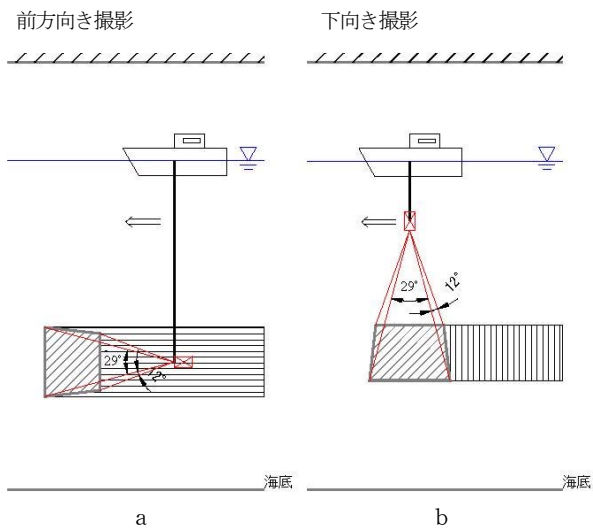


図-5 撮影パターン（実海域試験）

試験では、既存調査で報告されているすべての構造物変状箇所やケーソン目地を音響カメラの再生画面で認識することができた。また、音響カメラで見逃した欠損箇所がないか潜水目視点検を実施したが、新たな欠損箇所は見つからなかった。

その他の撮影条件として、撮影距離は近距離ほど良好であり、船速は可能な限り遅い方が良好であった。

また、前方・後方撮影を実施した結果、被写体の同一箇所を違った角度から撮影することで、変状の発見が容易となることを確認した。（図-6）

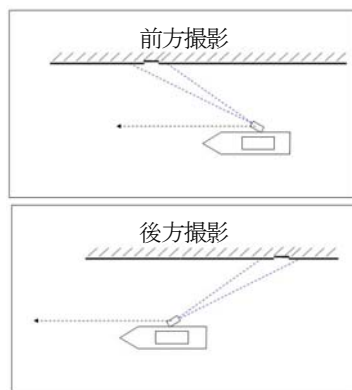


図-6 前方撮影と後方撮影

(3) 撮影方法の検討

(2) より、分解能を確保しつつ岸壁面全体を撮影する方法を検討した結果、音響カメラの向きを前方向きとし、水平方向に移動させることにより、各水深部を測線状に撮影することとした。（図-7 a、b）

但し、撮影距離の安全性を考慮して、岸壁・船舶間の距離が3m以上必要とし、撮影距離が近距離ほど画像が良好であることから、撮影角度は45度とし撮影距離を5mとしている。（図-7 c）

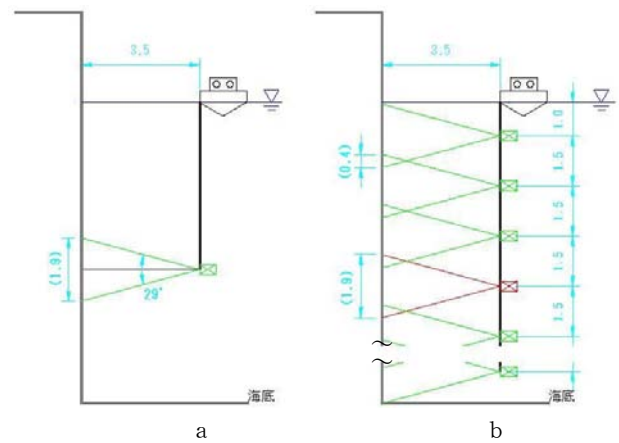


図-7 撮影方法

(4) モザイク図の作成

撮影試験において得られた画像より、処理範囲を決定し画像処理することで、1測線分のモザイク画像（写真-2 a、b）、さらに、岸壁面全体のモザイク画像（写真-2 c）を作成した。

モザイク図の作成方法としては以下の方法が考えられる。

音響カメラの位置情報（水平方向、鉛直方向）、姿勢情報より、対象構造物の相対的な位置関係を用いて幾何学的補正・接合を行う系統的幾何補正 ①、得られた画像のみから幾何学的補正・接合を行う非系統的幾何補正 ②、両者の利点を組み合わせて幾何学的補正・接合を行う併用幾何補正がある。

①では、画像取得時（フレーム毎）のカメラ姿勢（ロール、ピッチ、撮影方位）と構造物での3次元情報（あるいは音響カメラと対象構造物までの距離、撮影角度）が必要となる。

過年度においては②の手法（マッチング処理）で1測線分のモザイク画像を作成した。（写真-2 a）なお、参考に離隔・撮影角度を一定値として①の手法でも作成

している（写真-2 b）。

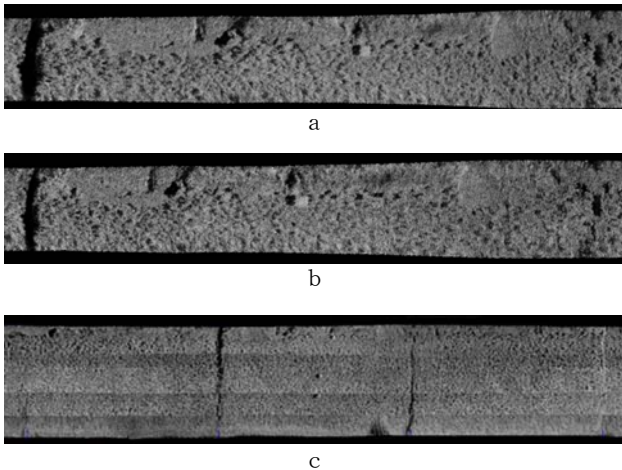


写真-2 モザイク画像

結果として、マッチング処理による1測線モザイク図の方が、標定物の縁辺部が滑らかに変状を識別するためには有利と見られる。これは、画像マッチング処理によって動揺の影響が軽減された結果と考えられる。一方、変状の位置についてみると、マッチング処理による1測線モザイク図に2m程度の位置誤差がみられた。

(5) 検討事項

画像解析においては、カメラ位置から被写体までの距離を一定距離としてモザイク図作成を行ったため、位置誤差が生じた。また、水深7mでの撮影では、水流によるポールの撓みによりカメラに傾斜が生じたため、被写体位置に大きな誤差が生じた。

以上より、姿勢情報や計測対象との位置関係を考慮した処理を行うことで、より良いモザイク画像が得られる可能性がある。

その他、過年度においては、架装装置、画像解析装置の検討を行った。

4. 撮影試験（平成20年度）

平成20年度は、2回の撮影試験を下記の内容で実施した。

予備試験（第1回）

- ・機器類の構成とデータ取得方法の確認

検証試験（第2回）

- ・架装装置性能の検証
- ・画像解析ソフトウェアによるモザイク図作成
- ・平成19年度試験撮影結果との比較検証

なお、当年度においては、架装装置の製作と、画像解析ソフトウェアの開発の委託研究を実施している。

Tadashi Igarashi, Tadashi Nagase, Akio Onishi

(1) 予備試験（第1回）

a) 試験内容

機器類の構成とデータ取得方法の確認のため、機器類の設置は、ポール直付、船体直付の2系統とし撮影を行った。（図-8）

また、音響カメラ～岸壁側面間の距離をリアルタイムに計測し傾斜を補正するには、音響カメラの位置情報（又は実測距離）、姿勢情報を把握する必要がある。このため、モーションセンサ、RTK-GPS装置のほか、音響測深機、傾斜計等の機器類を使用し、データ取得を行った。主な使用機器類を表-1に示す。

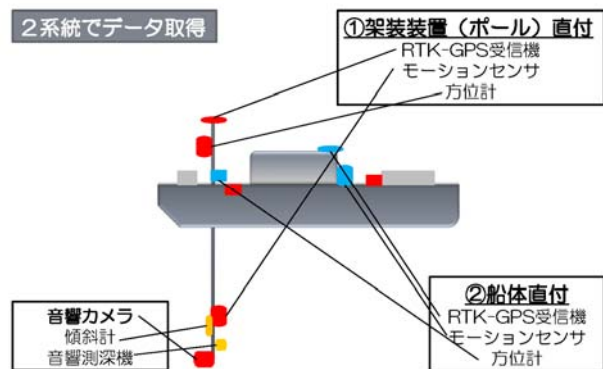


図-8 機器取付図

表-1 主な使用機器類

名称	製造元	規格・性能
音響カメラ	DIDSON (Sound Metrics社製)	最大レンジ 1.1MHz使用時40m 1.8MHz使用時12m 線密度 1.1MHz：0.6°間隔48本のビーム 1.8MHz：0.3°間隔96本のビーム 視野角29° フレームレート5~27f/s 焦点距離1~40m
モーションセンサ	DMS2-05型 (TSS社製)	波の周期1~20秒、波高1mを95%(5cm)まで補正
ジャイロコンパス	OCTANS (IXSEA OCEANO社製)	方位±0.1°Secant Latitude ロール・ピッチ±0.01° ヒープ・サージ・スウェイ 5cm or 5%
音響測深機	PS20R (カシヨ社製)	±3cm×水深/1000
RTK-GPS	MS750 (Trimble社製)	測位精度：水平位置 1cm±1ppm ×測定距離 無線機内蔵型
音速度センサー	SVPS型 (AML社製)	測定精度：1m/秒 最大測定深度：100m 応答時間：約20秒

データ取得は、系統別に2台、画像取得用に1台の計3台のPCで行い、データ取得時刻はGPS時刻データにより同期している。

b) 試験状況

試験状況は以下のとおりである。

- ・日時 平成20年10月13日
- ・場所 川崎市川崎区千鳥町

機器類は船体前方右側に固定したポールと船体のそれぞれに取付け、ポール先端には音響カメラを図-7のように設置し、近傍にはモーションセンサ及び音響測深機、傾斜計を図-8のように取付けた。なお、撮影前には音速度を撮影水深にて測定した。

船舶からの撮影では、岸壁側面に沿って船速1~2ノット程度でゆっくり航行し、航行計画測線からのずれによる音響カメラの方向を補正するため、ポールを手動で回転させて角度を微調整した。(図-9)

また、撮影箇所となる岸壁では、RTK-GPS装置による測量を実施し、処理画像の基準位置となる標定物(スタッフ等)を設置した。

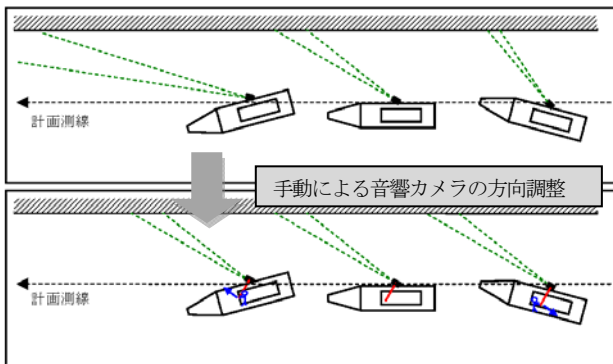


図-9 航行図

(2) 検証試験 (第2回)

a) 試験内容

本試験では、-14m岸壁点検に対応するための架装装置性能の検証を行ったほか、画像解析ソフトウェアによるモザイク図作成、平成19年度試験撮影結果との比較検証を行った。

①架装装置性能の検証

架装装置(試作機)の全景を写真-3に示す。

主要部材であるポールは-14m岸壁点検を想定し、ポール最伸長を13m、また、可搬性を考慮し最縮長を2.7mとした。撮影位置は1~13mの範囲で可能であり、手動のワイヤーロープ巻き上げ機で位置調整し、撮影位置でポールが縮まないよう、エアで加圧することにより固定する仕組みとなっている。

また、最伸長で、船速度2ノットで航行した場合、画

像処理に影響を与えないよう、ポール先端を船首・船尾からロープで固定している。

材質はアルミ合金及びステンレス製で、重量は150kg程度であり、小型船舶にも搭載できる。

本架装装置を使用し、-14m撮影時の画像への影響や操作性等を検証する。



写真-3 架装装置

②解析ソフトによるモザイク図作成

モザイク図は、既に検討されている2つの手法(系統的幾何補正、非系統的幾何補正(マッチング処理))により画像解析ソフトウェアにて作成する。

なお、本ソフトウェアの開発は、東京大学生産技術研究所・海中工学研究センター・浅田教授への委託研究にて実施している。

③平成19年度試験撮影結果との比較検証

本試験箇所は平成19年度試験で使用した小樽港第2埠頭11バース、第3埠頭14バースを含めた箇所設定しており、本年度撮影結果との比較検証を行う。

b) 試験状況

試験状況は以下のとおりである。

- ・日時 平成20年12月9~13日

- ・場所 北海道小樽市色内
小樽港港町埠頭
第2埠頭
第3埠頭

機器類の設置、試験方法は予備試験（第1回）と同様であるが、ポールに替わり架装装置を使用し、データ取得は架装装置直付の1系統のみとしている。

試験状況を写真-4に示す。



写真-4 試験状況

5. 今後の計画

各試験については以下の点に留意して本年度の取りまとめを行う予定である。

(1) 機器類の構成とデータ取得方法の確認

本年度の撮影試験結果で得られたデータにより、画像

解析ソフトウェアに対し最適なデータを提供する機器類の構成を検討する。

(2) 架装装置性能の検証

架装装置の性能については、ポールの伸縮動作、航行時の耐久性等の確認と、最深部（-14m）撮影時の画像データ有効性を確認する。

また、架装装置の現場適合性については、可搬性、艀装方法、サイクルタイムについて確認する。サイクルタイムは、本年度の架装装置は試作機につき調整等に多くの時間を要したため、今後の検討事項とする。

(3) 画像解析ソフトウェアによるモザイク図作成

2つの方法で作成したモザイク図を点検（計測）システムへ摘要する際、それぞれの特徴である音響カメラの位置情報・姿勢情報による正確な変状位置、もしくは、マッチング手法による滑らかな画像の双方について、優位性を検討する。

(4) 平成19年度試験撮影結果との比較検証

検証試験（第2回）では、平成19年度試験と同じ箇所を撮影しており、撮影位置精度や分解能について比較検証する。

平成20年度撮影試験では、更に、後方撮影を実施しており、撮影方法の違いによる変状の確認方法を考察する。

参考文献

- 1) 音響ビデオカメラと海中作業（作業船 第 265 号 浅田 昭）
- 2) サウンドメトリックス社HP
(<http://www.soundmetrics.com/>)